第38卷 第5期
2021年9月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

腾格里沙漠南缘昌岭山1872年以来干湿变化研究

祁 京[1,2]， 焦 亮[1,2]， 陈 可[1,2]， 柒常亮[1,2]， 薛儒鸿[1,2]
（1. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；
2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要：选取腾格里沙漠南缘对气候变化敏感的昌岭山为研究区，通过分析昌岭山优势树种青海云杉树轮宽度年表与气候因子的相关关系，得出5—7月PDSI（帕默尔干旱指数）与树轮宽度年表的相关性较强（r=0.621，P<0.001），干旱是影响树木径向生长的主控气候因子；通过建立树轮宽度年表和PDSI的线性回归方程，重建了研究区过去146 a以来的PDSI干旱变化；同时基于重建的PDSI的年际变化表明：研究区在过去146 a间共经历了4个干旱期（1882—1894年，1915—1936年，1966—1978年，1989—2015年）。周期分析结果显示重建序列存在2 a、2.6~3 a、11 a左右的变化周期，说明研究区气候变化主要受厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）和太阳黑子活动的驱动。研究结论对于探讨中国西北干湿变化规律及预测未来气候变化条件下该区域亚高山森林生态系统的变化提供了科学依据。

关键词：青海云杉；PDSI；干湿历史变化；树轮宽度年表；昌岭山；腾格里沙漠

全球变暖已成为不争的事实，在1901—2012年期间全球平均气温上升了0.89 ℃，而且这种升温趋势还将会在未来几十年进一步加强[1]。北半球中高纬度地区是全球地表增温幅度最高的区域，特别是中国的西北地区[2]。同时也有研究表明，中国西北气候出现了暖干向暖湿的转变过程，而且这种变化在新疆、祁连山区、河西走廊等地区最为显著[3-4]。因此，中国西北地区的气候变化还存在着不确定性，非常有必要了解历史气候的变化规律和驱动机制，才能更准确地预测未来的气候发展趋势。同时全球气候变化不仅对全球植被产生了重要影响，而且气候变暖也导致了全球干旱范围、频度和强度也有所加深[5-7]。而树木年轮具有对气候变化敏感、连续性强、时空分辨率高等优势，是研究历史气候变化非常重要的代用材料[8]。

腾格里沙漠南缘的昌岭山是祁连山东延北伸的独立山体，是中国距离沙漠最近的天然森林区[9]。同时，该地区又位于中国沙漠和黄土的过渡带，是东亚季风的西北边缘区，该区域优势针叶树木生长对气候变化较为敏感，树轮资料记录了较多过去气候变化信息，比较适合展开树轮年代学的研究[10-11]。通过分析昌岭山树木径向生长对气候变化的响应，确定了该研究区树木径向生长容易受到干旱胁迫的制约[12-13]；基于树轮宽度指数重建了该地区140 a来的降水过程及古浪河158 a以来5—7月的径流变化[14-16]。昌岭山以往的研究主要聚焦于树木径向生长与气候的关系以及重建气温、降水、河流径流量等方面，但是忽视了该区域历史干湿变化的探讨。同时，帕默尔干旱指数（PDSI）是基于水平衡方程的供需概念，根据降水和温度数据以及土壤含水量的计算反映区域干湿变化的代用指标，在干旱区的相关研究中得到了广泛应用[17]。近年来利用树木年轮学方法计算的PDSI栅格数据已经重建了西北地区干旱历史，这也表明PDSI在反映西北地区干旱状况方面具有优势和潜力[18-19]。所以有必要在气候变化敏感的昌岭山地区基于重建PDSI研究分析该区域的干湿历史变化。

鉴于此，本文以昌岭山为研究区域，以优势针叶树种青海云杉为研究树种，通过构建树轮宽度年表，建立树轮宽度年表与PDSI关系方程，重建昌岭

收稿日期：2021-04-23； **修订日期：**2021-07-16
基金项目：国家自然科学基金（41861006）；中国科学院"西部之光"人才培养计划资助项目（2020XBZG-XBQNXZ-A）；西北师范大学青年教师科研能力提升计划-重点项目（NWNU-LKQN2019-4）；甘肃省自然科学基金（20JR10RA093）
作者简介：祁京（1999-），女，主要从事树木年轮生态学方面的研究. E-mail: 2532219116@qq.com
通讯作者：焦亮. E-mail: jiaoliang@nwnu.edu.cn

山自1872年以来146 a的PDSI变化,并分析该区域干湿变化的驱动力。研究结果对准确掌握昌岭山的干湿历史变化规律,特别是在全球气候变暖背景下科学预测中国西北亚高山森林生态系统未来的变化具有重要意义。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

昌岭山位于甘肃省武威市古浪县东北部(图1),腾格里沙漠南缘,属于祁连山东部余脉,呈东西走向,海拔2250~2900 m;属于温带大陆性干旱气候,气候干燥,降水少,温差大,年平均气温为8.8 ℃,1月气温最低,平均气温为-12.2 ℃,7月气温最高,平均气温为28.9 ℃,年总降水量185 mm,降水主要集中在6—9月。植被垂直地带性明显,由低到高为:半干旱荒漠草原带、落叶阔叶林带、常绿针叶林带以及高山灌丛带,林下土壤为灰褐森林土。其优势树种为青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)和油松(*Pinus tabuliformis*)。

1.2 样本采集及年表建立

1.2.1 样本采集 2019年7月在昌岭山北坡上林线青海云杉和油松混生林进行采样(37.44°N,103.59°E,海拔2562 m)。为尽量减少年轮受到立地条件影响,选取生长状况良好、没有遭受明显火灾和病虫害影响的树木进行采集。在距离地面1.3 m的胸径位置用直径5.15 mm的生长锥分别沿平行坡度方向和垂直坡度方向钻取树芯,舍弃烂芯和明显偏离髓心的树芯后,共采集30棵活树的60个样芯。

1.2.2 样本处理及年表建立 将样本放入编过号的纸筒中带回实验室后,按照树木年代学的标准程序进行处理。首先,将获得的样芯用乳胶放置在木槽中,待样芯风干后先后用200、400、600目砂纸打磨至可见到清晰的树轮边界,然后用显微镜交叉定年,再用精度为0.001 mm的LINTAB年轮测量系统测量每个样芯的树轮宽度。为保证定年和测量结果的准确性,使用COFECHA软件对年表进行检验。使用ARSTAN程序用负指数或线性回归消除原始年轮宽度系列的生长趋势,以及各个序列的自回归模型去除序列的自相关性。最后得到研究区差值年表(RES)、标准年表(STD)和自回归年表(ARS)3种类型的树轮宽度年表,并计算了年表的主要特征参数。由于差值年表包含高频变化信息,更适于树轮生长-气候关系研究,因此本文选用差值年表进行后续分析。

1.2.3 计算年表特征参数 计算了树轮宽度年表的平均敏感度(MS)、标准偏差(SD)、一阶自回归系数(AC1)、样本相关系数(*R*1)、树内相关系数(*R*2)、树间相关系数(*R*3)、第一主分量方差(PC1)、信噪比(SNR)、样本总体解释量(EPS)和信号强度(SSS)。其中,MS表征了连续年之间树木年轮宽度指数的变化;SD反映了每个年表的年际变化;AC1代表前一年气候对当年树木生长的影响;PC1表示第一主分量方差;*R*反映了年表序列间相关关系;SNR和EPS代表年代间共同气候信息的强度;EPS>0.85表示年表可以用于树轮气候学分析(图2)。

1.3 气象资料

本研究所用气象资料使用距离采样点最近的

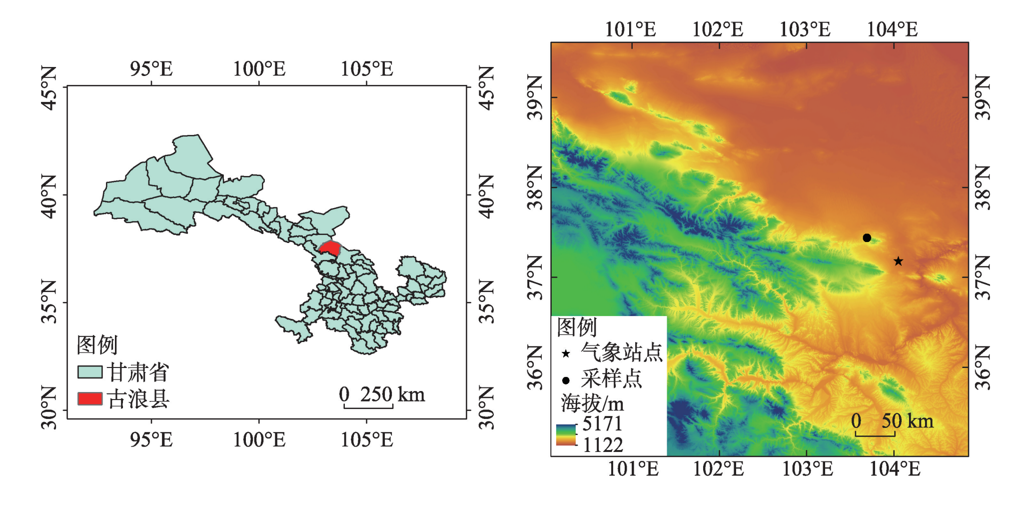


图1 研究区示意图

Fig. 1 Overview of the study area

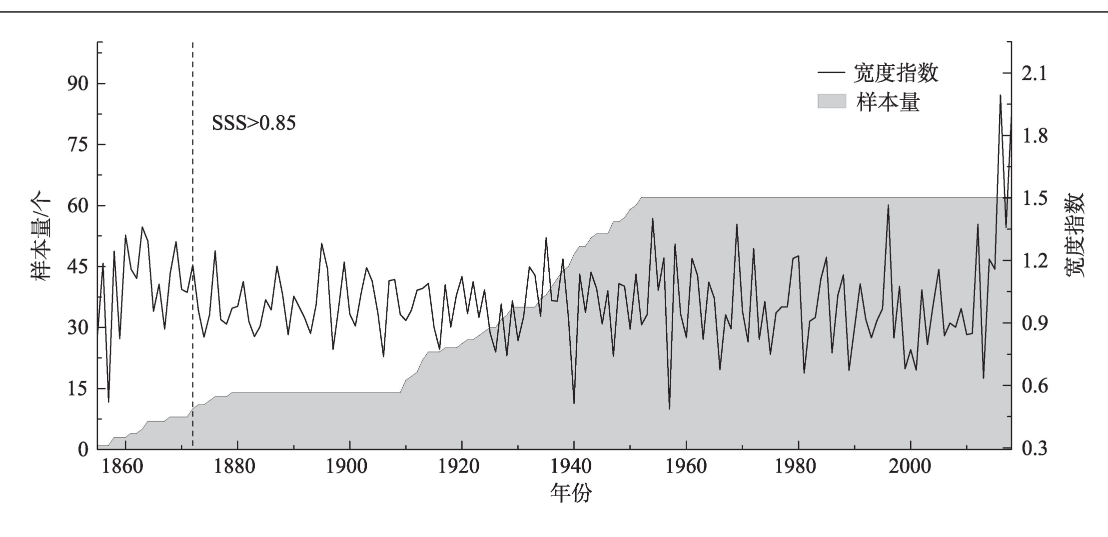


图2 昌岭山青海云杉树轮宽度差值年表

Fig. 2 Tree-ring width residual chronology(RES)of *Picea crassifolia* in Changling Mountain

景泰气象站(37.11°N,104.03°E,海拔1627 m,距离采样点64.4 km)的气候资料,时间间隔为1957—2018年。所用的气候数据有月平均温度(图3)、平均最低温度、平均最高温度、总降水量和帕默尔干旱指数(PDSI)。由于树木径向生长对气候因子响应具有滞后的特点,因此本研究选取了前一年10月到当年10月的气象数据进行分析,明确影响树木径向生长的主控气候因子。

1.4 处理分析方法

运用SPSS 25.0计算1957年以来青海云杉树轮宽度差值年表与气象因子之间的相关系数,由于树木径向生长对气候因子响应具有滞后的特点,为了明确影响树木径向生长的主控气候因子,因此本研究选取了前一年10月到当年10月的气象数据进行分析。明确限制研究区树轮径向生长的主要气候因子。在确定影响树木径向生长的主控气候因子后,利用线性回归模型构建树轮宽度年表与主控气候因子的重建方程。运用分段检验对重建方程的稳定性和可靠性进行检验,检验过程中用了相关系数(r)、有效系数(CE)、误差缩减值(RE)、符号检验(ST)、F检验等多个指标[20-22]。利用MTM软件对重建序列进行多窗谱分析,对重建序列进行周期分析[23-24]。然后重建序列与时间间隔为1957—2018年的CRU数据进行空间相关分析[25]。

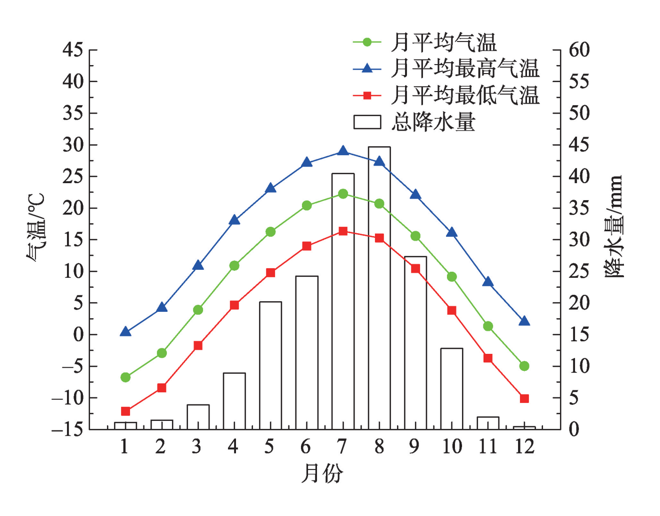


图3 1957—2018年昌岭山月平均气温,平均最低气温,平均最高气温和总降水量的变化

Fig. 3 Monthly mean minimum temperature, mean temperature, mean maximum temperature and total precipitation averaged for the time period of 1957-2018 using the records from Changling Mountain study area

2 结果分析

2.1 年表统计学参数特征

通过对采样点序列长度为164 a的树轮宽度年表参数进行统计分析,(表1)可以看出,年表信噪比(SNR:10.14)较高,样本解释量(EPS)大于最低阈值0.85,表明建立的树轮宽度年表质量较高;年表平均敏感度(MS:0.187)和标准差(SD:0.31)较高,表明树木径向生长对气候变化的响应敏感;样本的相关系数(样本相关系数$r1$:0.454;树内相关系数$r2$:0.6715;树间相关系数$r3$:0.28)和第一主分量方差(PC1:0.351)较高,说明各个年表波动较为一致,样本总体代表性较好,包含了共同的气候信息。SSS>0.85时的样本量可以确定可靠最低复本量,则可信

表1　昌岭山青海云杉差值年表主要特征参数

Tab. 1　Main characteristic parameters of *Picea crassifolia* at different altitudes in the Changling Mountains

统计特征	统计值
序列长度	1855—2017年
平均敏感度(MS)	0.187
标准差(SD)	0.312
一阶自回归系数(AC1)	0.61
序列间相关系数(*r*1)	0.297
树内相关系数(*r*2)	0.6715
树间相关系数(*r*3)	0.28
第一主分量方差(PC1)/%	0.351
信噪比(SNR)	10.14
样本总体解释量(EPS)/%	0.91
信号强度(SSS)>0.85起始年(树芯数)	1872年(9)

年表开始的时间为1872年,共146 a。

2.2　树木径向生长与气候因子的相关分析

通过树轮宽度年表与月PDSI的相关分析显示(图4):树轮宽度年表与前一年10月(r=0.345,P<0.01)、11月(r=0.360,P<0.01)、12月的PDSI(r=0.371,P<0.01)显著相关,与当年1—9月的PDSI(r=0.269~0.605,P<0.01)显著相关,这表明了干旱是昌岭山树木径向生长的主控气候因子。特别是树轮宽度年表与当年5—7月的平均PDSI的相关性最高(r=0.621,P<0.001),说明树木生长季初期的干旱是制约研究区树木径向生长最重要的气候因子。

2.3　重建方程的建立与检验

综上所述,干旱是研究区青海云杉的主控气候因子,由于5—7月平均PDSI与树轮差值年表具有很强的相关性,相关系数达到了重建标准,而且5—

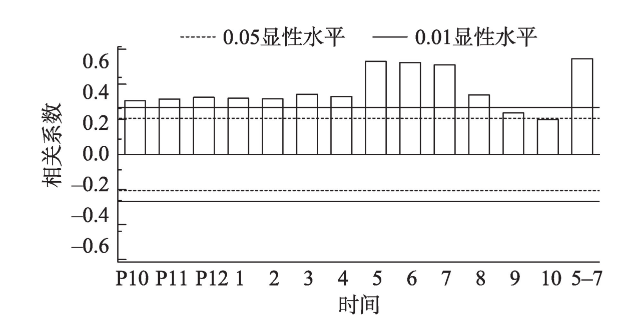


图4　昌岭山青海云杉树轮宽度年表与PDSI的相关性

Fig. 4　Correlations between tree-ring width chronology of *Picea crassifolia* and climatic factors of PDSI

7月降水和温度对树轮宽度影响也最为显著,所以以树轮差值年表为自变量,研究区5—7月的PDSI为应变量,利用一元线性回归模型构建了研究区过去146 a 5—7月的PDSI重建方程:

$$PDSI_{5-7} = 5.177RES - 5.094$$

式中:$PDSI_{5-7}$表示5—7月的平均PDSI;RES表示树轮宽度差值年表。

图5和表2显示平均PDSI重建值与实测值的相关系数为0.621,重建方程的方差解释量为38.6%,F检验值33.9,P<0.01;分段检验重建方程结果显示误差缩略值RE和有效系数CE的取值范围都为1~+∞,且都大于0。这些结果都说明构建的线性回归方程具有较好的稳定性,重建序列可信度高。

2.4　重建的干湿历史变化分析

分析昌岭山过去146 a来5—7月的PDSI变化可以看出,自1855年以来研究区PDSI波动频繁,波动幅度在−3~5之间,最高值出现在2016年,为5.22;最低值出现在1957年,为−2.77,最高和最低值相差达到7.99(图6)。重建期内5—7月PDSI的平均值

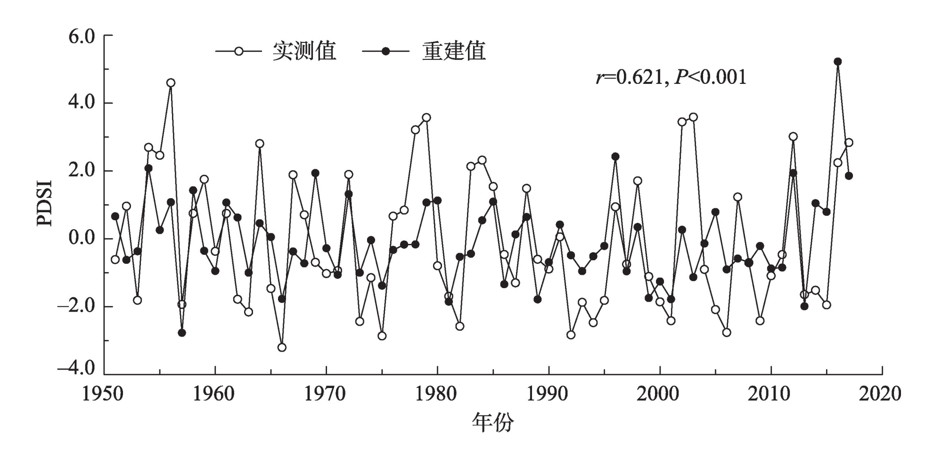


图5　1957—2017年昌岭山5—7月平均PDSI重建值和实测值

Fig. 5　Monthly mean PDSI from May to July and observed PDSI

表2 $PDSI_{5-7}$重建方程分段检验结果

Tab. 2 Test result of the reconstruction equation section

时段	校准期					时段/年	检验期			
	r	R^2	R^2_{adj}	F	ST		r	RE	CE	ST
1951—1983年	0.589	0.347	0.323	14.329	23+/10-*	1984—2017	0.657	0.353	0.344	30+/4-**
1984—2017年	0.657	0.432	0.409	19.009	30+/4-**	1951—1983	0.589	0.439	0.430	23+/10-*
1951—2017年	0.621	0.386	0.375	33.949	48+/19-**					

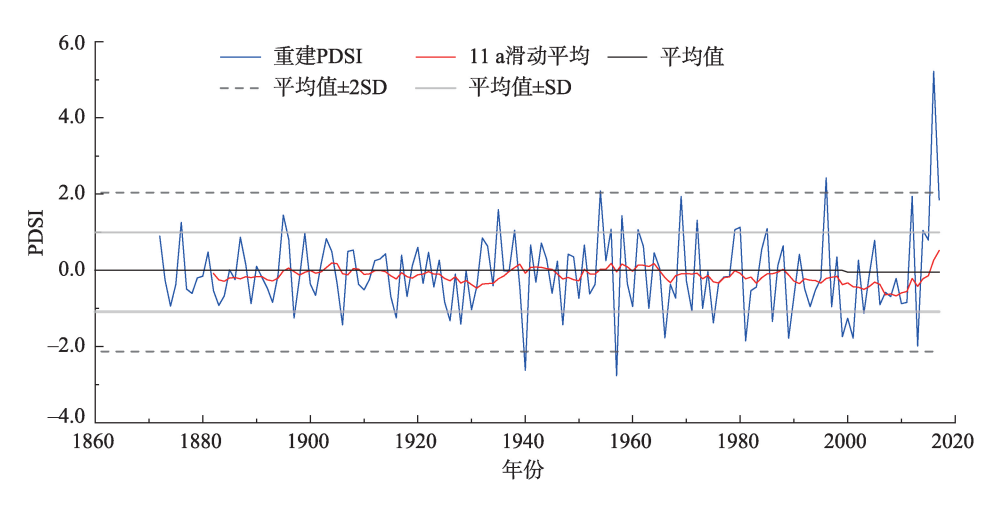


图6 5—7月平均PDSI重建序列变化分析

Fig. 6 Reconstruction sequence of monthly mean PDSI average from May to July

$PDSI_{mean}$为−0.05，标准差σ为1.04，定义高于1个标准差($PDSI_{mean}\pm\sigma$)表示湿润和干旱年，高于2个标准差($PDSI_{mean}\pm2\sigma$)表示极端湿润年和极端干旱年。由图6可见，在过去146 a内研究区极端湿润出现了3次，分别是1954年、1996年和2016年，占总年份的2.05%；极端干旱的年份出现了2次，分别是1940年和1957年，占总年份的1.37%；干旱年份和湿润年份各出现了18次，分别占总年份的12.33%。重建序列11 a滑动平均连续大于或小于平均值($PDSI_{mean}$=−0.05)为干湿期。由表3可以得出，在过去的146 a内昌岭山大致经历了1882—1894年、1915—1936年、1966—1978年和1989—2015年共4个干旱期，其中1989—2015年是持续时间最长的干旱期。

表3 过去146 a昌岭山干湿变化阶段及其距平值

Tab. 3 Stages of drought-wet variation and their anomalies in Changling Mountains in the past 146 years

干旱期	年数/a	气温距平值/℃
1882—1894年	13	−0.15
1915—1936年	22	−0.17
1966—1978年	13	−0.13
1989—2015年	26	−0.31

2.5 空间代表性和影响因子分析

用KNMI Climate Explorer同期的温度、降水、PDSI的区域CRU格点数据与重建的PDSI进行空间相关分析(图7)，来检验重建结果在更大范围上的空间代表性。结果表明，在祁连山附近(r=0.46，P<0.01)重建序列与CRU数据的相关性最好，而且重建结果与蒙古地区、哈萨克斯坦东部、我国东部地区降水变化相关性较好，与印度洋、大西洋东部、西太平洋、印度半岛的温度变化相关性高。

2.6 重建序列的周期分析

为了探究重建序列的规律性，对研究区过去146 a的5—7月平均PDSI序列利用多窗谱分析法(MTM)进行周期分析(图8)，其结果表示重建序列存在较为显著(P<0.1)的11 a左右的变化周期和显著的(P<0.01)8~8.6 a、2.6~3 a、2 a的变化周期。

3 讨 论

树木年轮是研究古气候变化的重要材料，基于树轮的历史气候重建不仅可以了解区域过去气候的变化规律，而且可以科学预测未来气候变化的趋

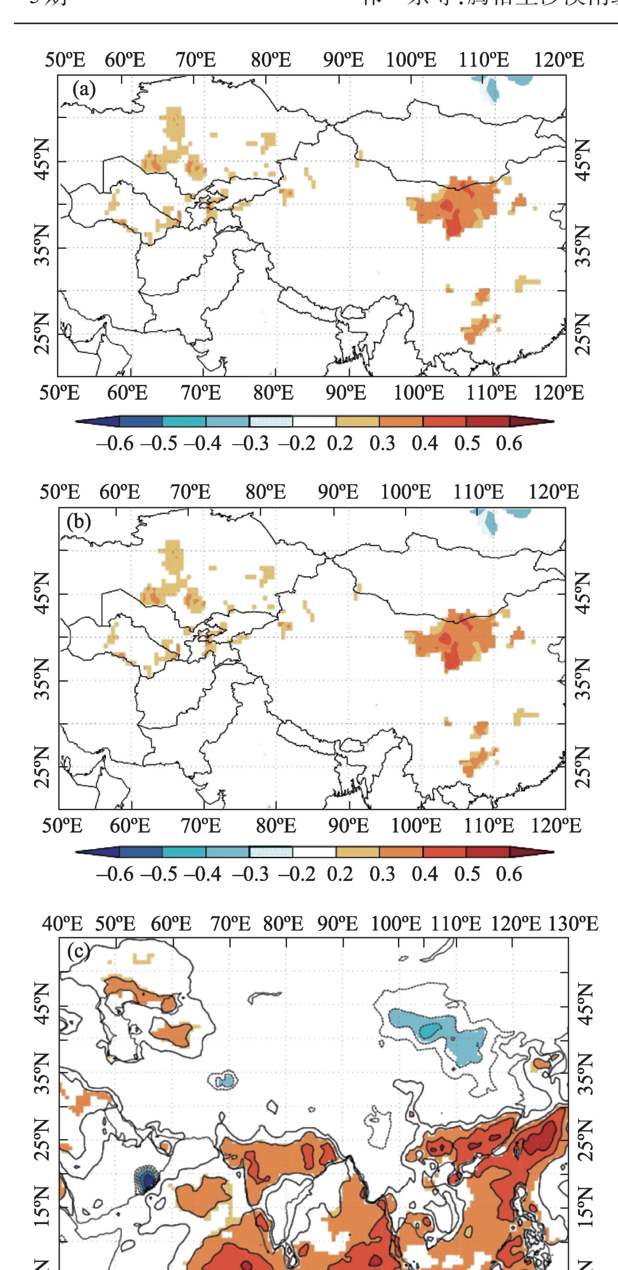
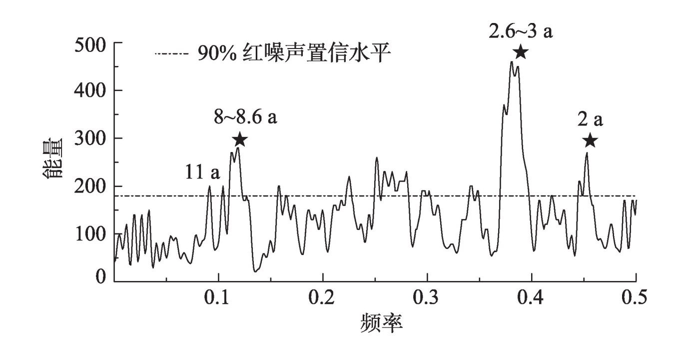


图7　1872—2017年昌岭山5—7月平均PDSI重建序列与PDSI、降水和温度的CRU格点数据的空间相关性

Fig. 7　Spatial correlation between mean PDSI from May to July and CRU grid data during 1872 to 2017 in Changling Mountain

势[11]。树木的生长主要集中在生长季节,因此春夏季节的气候变化对于树木的径向生长来说具有很大的影响。本文研究也证实了这一结果,昌岭山青海云杉树轮宽度年表和当年5—7月的平均PDSI相关性最好(图4),说明5—7月生长季初期的PDSI是研究区域树木生长的主控气候因子,可以作为重建



注:★表示达到95%红噪声置信水平。

图8　PDSI重建序列多窗谱周期分析结果

Fig. 8　The multi-taper spectrum analysis of reconstructed PDSI sequence

的资料。研究区5—9月是树木的生长季,其中5—7月是占全年树轮宽度比例较高的春材生长的季节,也是树木生长的速生季。相关分析的结果也说明了生长初期的干旱对树木宽度的影响是最大的。而且研究区树木宽度年表在5—7月与温度呈现负相关,与降水呈现正相关,也进一步说明研究区树木生长容易受到干旱胁迫的制约[26]。从树木生理角度来说,研究区在树木生长初期5—7月干旱程度越强越不利于树木形成层细胞的分裂,不利于积累更多的光合产物,从而限制树木径向生长。

根据重建结果可以得到研究区共经历了4个干旱期(1882—1894年、1915—1936年、1966—1978年和1989—2015年)。为了验证本文重建结果的可靠性,将重建结果与高尚玉等[14]重建的祁连山南缘过去140 a来的降水量变化进行对比,发现2个干旱期(1877—1894年和1924—1932年)相对应;与重建的甘肃1768—2006年降水变化年也有2个偏干阶段(1916—1933年和1989—1997年)和1个偏湿阶段(1953—1958年)相一致[27],这都说明重建昌岭山的干湿变化与祁连山南缘及整个甘肃地区的干湿变化趋势一致。将研究区PDSI的重建结果与祁连山东部188 a上年8月至当年6月降水量的重建结果比较,有1个干旱时期(1920s)一致[28];与我国西北地区季节间干湿变化的时空分布结果进行对比和分析,本文的重建结果符合20世纪90年代之后西北地区夏秋季干湿变化较为剧烈,有变干趋势的结论[29];与重建的祁连山东段冷龙岭1848年以来的干湿变化结果对比,其中干旱期(1877—1880年和1974—1975年)和湿润期(1950—1956年),与本文重建结果相似[30],这些也都说明本文重建结果在表征祁连

山东部及整个西北地区更大范围空间的干湿变化上也具有代表性。

本文重建的5—7月平均PDSI序列在20世纪后期呈现波动上升，与全球气候变暖的趋势相似，说明在全球气候变暖的影响下，腾格里沙漠南缘的气温增加、温度上升超过了树木生长的最低气温阈值，使得祁连山优势针叶树木青海云杉的径向生长受到了干旱胁迫。目前该地区树木的径向生长仍受干旱的制约，随着西北地区气候从暖干到暖湿的转变，温度的进一步升高，未来可能影响树木的生长从而导致森林的衰退，这一点也可以通过树轮宽度年表的变化来进一步证明，从2005—2017年树轮宽度总体呈现下降趋势。未来应该加强对该地区树木生长情况的动态监测，采取相应措施来维持该区域森林生态系统的稳定性。

区域气候变化受到太阳活动、大气-海洋变异性等大规模气候影响因素的影响[31]。根据重建序列的周期分析结果发现：昌岭山干湿变化存在着2 a、2.6~3 a、8~8.6 a、11 a左右的变化周期。一般厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）的周期为2~7 a，与重建序列2 a和2.6~3 a的变化周期较为相似[32-35]。且已经有研究证明ENSO循环对甘肃省的降水变化有影响，进而影响了腾格里沙漠南缘的干湿变化和树木生长。同时也说明腾格里沙漠南缘地区不仅受到局部区域气候的影响，而其还受到全球大尺度气候变化的影响[36-37]。重建序列11 a左右的周期变化与太阳黑子的Hale周期一致，说明太阳黑子活动也是研究区气候变化的驱动因子之一。

4 结 论

（1）生长季初期的干旱是腾格里沙漠南缘昌岭山树木径向生长的主控气候因子。

（2）昌岭山气候在过去146 a共经历了4个干旱期（1882—1894年、1915—1936年、1966—1978年、1989—2015年）。

（3）昌岭山气候变化存在2 a、2.6~3 a、8~8.6 a、11 a变化周期，厄尔尼诺-南方涛动和太阳黑子活动是研究区的气候干湿变化的主要驱动力。

参考文献（References）：

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[2] Shi Y, Shen Y, Kang E, et al. Recent and future climate change in Northwest China[J]. Climatic Change, 2007, 80(3-4): 379-393.

[3] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.]

[4] 施雅风, 沈永平. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探[J]. 科技导报, 2003(2): 54-57. [Shi Yafeng, Shen Yongping. Preliminary study on the signal, influence and prospect of climate transition from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Science and Technology Review, 2003(2): 54-57.]

[5] Jiang P, Liu H Y, Wu X C, et al. Tree ring based SPEI reconstruction in central Tianshan Mountains of China since A. D. 1820 and links to westerly circulation[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(6): 2863-2872.

[6] Chen F, Yuan Y J, Yu S L, et al. A 225-year long drought reconstruction for east Xinjiang based on Siberia larch (*Larix sibirica*) tree-ring widths: Reveals the recent dry trend of the eastern end of Tien Shan[J]. Quaternary International, 2015, 358: 42-47.

[7] Xu G, Liu X, Valeria T. Regional drought shifts (1710-2010) in East Central Asia and linkages with atmospheric circulation recorded in tree-ring $\delta^{18}O$[J]. Climate Dynamics, 2018, 52: 713-727.

[8] 焦亮, 王玲玲, 李丽, 等. 阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的分异响应[J]. 植物生态学报, 2019, 43(4): 320-330. [Jiao Liang, Wang Lingling, Li Li, et al. Differential response of radial growth of *Larix sibiricus* to climate change in Altay Mountains [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(4): 320-330.]

[9] 鲁瑞洁, 夏虹. 腾格里沙漠南缘油松树轮宽度变化及其对气候因子的响应[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 399-402. [Lu Ruijie, Xia Hong. Variation of tree ring width of *Pinus tabulaeformis* in the southern margin of the Tengger Desert and its response to climate factors[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(3): 399-402.]

[10] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H. Large-scale temperature inferences from tree rings: A review[J]. Global and Planetary Change, 2004, 40(1/2): 11-26.

[11] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990. [Wu Xiangding. Tree Rings and Climate Change[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990.]

[12] 贾飞飞, 孙翠洋, 孙红月, 等. 昌岭山两个优势树种径向生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6332-6340. [Jia Feifei, Sun Cuiyang, Sun Hongyue, et al. Response of radial growth of two dominant tree species to climate change in Changling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6332-6340.]

[13] 王炳尧, 刘星辰, 刘立超. 1957—2017年腾格里沙漠地区降水

量[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 163-170. [Wang Bingyao, Liu Xingchen, Liu Lichao. Precipitation in the Tengger Desert during 1957-2017[J]. Journal of Desert Research, 2010, 40(4): 163-170.]

[14] 高尚玉, 鲁瑞洁, 强明瑞, 等. 140年来腾格里沙漠南缘树木年轮记录的降水量变化[J]. 科学通报, 2006, 26(3): 326-331. [Gao Shangyu, Lu Ruijie, Qiang Mingrui. et al. Precipitation changes recorded by tree rings in the southern margin of the Tengger Desert during the past 140 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 26(3): 326-331.]

[15] 贾飞飞, 孙翠洋, 孙红月, 等. 树轮记录的古浪河158 a以来5—7月径流变化[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 114-121. [Jia Feifei, Song Cuiyang, Song Hongyue. et al. Changes of runoff recorded by tree rings from May to July in Gulang River since 158 a[J]. Ecology and Environment, 2020, 29(1): 114-121.]

[16] 韩超, 肖生春, 丁爱军, 等. 腾格里沙漠南缘青海云杉(*Picea crassifolia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)年轮记录的气候变化[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 50-58. [Han Chao, Xiao Shenchun, Ding Aijun, et al. Climate change recorded by tree rings of *Picea crassifolia* and *Pinus tabulaeformis* in the southern margin of the Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 50-58.]

[17] Palmer W C. Meteorological Drought[R]. Weather Bureau Research. Paper 45. US Department of Commerce Weather Bureau: Washington, D. C, 1965: 58.

[18] Li J, Chen F, Cook E R, et al. Drought reconstruction for North Central China from tree rings: The value of the Palmer drought severity index[J]. International Journal of Climatology, 2010, 27: 903-909.

[19] Li J, Gou X, Cook E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in Northwest China[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L07715.

[20] Mccarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(7-8): 771-801.

[21] 焦亮, 马罗, 张同文, 等. 树轮记录的阿尔泰山中段1798年以来6-7月平均最低气温变化[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1944-1958. [Jiao Liang, Ma Luo, Zhang Tongwen, et al. Variation of average minimum temperature in June-July recorded by tree rings in the middle part of the Altay Mountains since 1798[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1944-1958.]

[22] Fritts H C. Tree Rings and Climate[M]. New York: Academic Press, 1976.

[23] Mann M E, Lees J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series[J]. Climatic Change, 1996, 33(3): 409-455.

[24] 秦进, 白红英, 刘荣娟, 等. 近144年来秦岭太白山林线区3-6月平均气温的重建[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7585-7594. [Qin Jing, Bai Hongying, Liu Rongjuan, et al. Reconstruction of March-June mean temperature in the Taibai forest line of the Qinling Mountains in the past 144 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7585-7594.]

[25] Jiao L, Wang S J, Jiang Y, et al. A 333-year record of the mean minimum temperature reconstruction in the western Tianshan Mountains, China[J]. Geochronometria, 2019, 46(1): 37-48.

[26] 王婷婷, 冯起, 李宗省, 等. 1960—2012年祁连山东段古浪河流域极端气候事件研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 598-606. [Wang Tingting, Feng Qi, Li Zongxing, et al. Extreme climatic events in Gulang River Basin in the eastern Qilian Mountains during 1960-2012[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 598-606.]

[27] 陈峰, 魏文寿, 袁玉江, 等. 基于多点树轮序列的1768—2006年甘肃降水量变化[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1520-1526. [Chen Feng, Wei Wenshou, Yuan Yujiang, et al. Changes of precipitation in Gansu Province from 1768 to 2006 based on multi-point tree-ring series[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1520-1526.]

[28] 李颖俊, 勾晓华, 方克艳, 等. 祁连山东部188a上年8月至当年6月降水量的树轮重建[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1393-1401. [Li Yingjun, Gou Xiaohua, Fang Keyan, et al. Tree-ring reconstruction of precipitation from August to June of last year in the eastern part of Qilian Mountains[J]. Journal of Desert Research. 2012, 32(5): 1393-1401.]

[29] 张永, 陈发虎, 勾晓华, 等. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布——基于PDSI数据[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1142-1152. [Zhang Yong, Chen Fahu, Gou Xiaohua, et al. Spatiotemporal distribution of interseasonal dry-wet variations in Northwest China based on PDSI data[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(11): 1142-1152.]

[30] 侯迎, 王乃昂, 张学敏, 等. 基于树轮资料重建祁连山东段冷龙岭1848年以来的干湿变化[J]. 山地学报, 2011, 29(1): 12-18. [Hou Ying, Wang Nai'ang, Zhang Xuemin, et al. Reconstruction of dry-wet changes in Lenglongling Mountains since 1848 based on tree-ring data[J]. Mountain Research, 2011, 29(1): 12-18.]

[31] 陈宝君, 钱君龙, 濮培民. ENSO对天目山柳杉树轮同位素的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 53-58. [Chen Baojun, Qian Junlong, Pu Peimin. Effects of ENSO on isotopes of tree rings of *Cryptomeria fortunei* in Tianmu Mountain[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2002, 22(4): 53-58.]

[32] Rittenour T M, Brigham-Grette J, Mann M E. El Niño-Like climate teleconnections in New England during the late pleistocene[J]. Science, 2000, 288(12): 1039-1042.

[33] Huber M, Caballero R. Eocene El Niño: Evidence for robust tropical dynamics in the "Hothouse"[J]. Science, 2003, 299(5608): 877-881.

[34] 龚道溢, 王绍武. 1867年以来的ENSO指数及变率[J]. 气候通讯, 1998(3): 11-17. [Gong Daoyi, Wang Shaowu. ENSO index and variability since 1867[J]. Climate Communications, 1998(3): 11-17.]

[35] 勾晓华, 杨涛, 高琳琳, 等. 树轮记录的青藏高原东南部过去457年降水变化历史[J]. 科学通报, 2013, 58(11): 978-985. [Gou Xiaohua, Yang Tao, Gao Linlin, et al. The history of precipitation

over the southeastern Tibetan Plateau in the past 457 years as recorded by tree rings[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(11): 978−985.]

[36] 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2000. [Li Dongliang, Liu Dexiang. Climate of Gansu[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000.]

[37] 朱炳瑗, 李栋梁. ENSO现象与甘肃省夏季降水[J]. 高原气象, 1989, 8(1): 64−69. [Zhu Bingyuan, Li Dongliang. ENSO phenomenon and summer precipitation in Gansu Province[J]. Plateau Meteorology, 1989, 8(1): 64−69.]

Drought-wet variation of Changling Mountain in Southeast of Tengger Desert since 1872

QI Jing[1,2], JIAO Liang[1,2], CHEN Ke[1,2], QI Changliang[1,2], XUE Ruhong[1,2]

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The Changling Mountain in the Southeast of Tengger Desert, which is sensitive to climate change was selected as the study area. The correlation between PDSI (Palmer Drought Index) from May to July and tree-ring width chronology were strongthe (r = 0.621, P<0.001). Drought was the main controlling climatic factor of the growth of dominant species Picea crassifolia in Changling Mountain through the analysis of correlation between tree-ring width chronologies and climate factors. By setting up a linear regression equation of tree-ring width chronology and PDSI, the drought-wet variation in the past 146 years was reconstructed. At the same time, there were four dry periods in all (1882−1894, 1915−1936, 1966−1978, and 1989−2015) in the past 146 years based on the reconstructed PDSI interannual variation. The period analysis results showed that the reconstructed sequence had periods of around 2 a, 2.6−3 a and 11 a, indicating that the driving factors of drought-wet variation were El Nino Southern Oscillation and sunspot activity in the study area. The research results provide a scientific basis for discussing the drought and wet variation rules in Northwest China and predicting changes in the subalpine forest ecosystem under the condition future climate change.

Keywords: *Picea crassifolia*; PDSI; drought-wet historical variation; tree-ring width chronology; Changling Mountain; Tengger Desert